

文章编号:1000-8055(2013)01-0129-07

含湿气流单缝冲击冷却数值模拟

谭晓茗, 李业芳, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 对饱和湿空气夹带液滴的含湿气流单缝冲击冷却进行了数值模拟, 比较研究了含湿气流中液滴相变换热/液滴载量比和单缝射流几何参数对强化换热效果的影响, 研究发现: 气流中液滴的加入对冷却效果的影响十分显著, 热流密度为 8000 W/m^2 的条件下, 空气中注入 5% 的液滴会比饱和湿空气对驻点区的冷却效果提高 90%, 当液滴载量比从 1% 提高到 5%, 冲击驻点区局部传热系数提高了 32%; 而合适的缝宽和冲击高度也是影响冷却效果的重要因素, 在该条件下冲击高度与缝宽的比值为 4.55 时冲击冷却效果最佳。

关 键 词: 含湿气流; 冲击冷却; 相变换热; 单缝; 数值模拟

中图分类号: V233.1; V233.2

文献标志码: A

Numerical simulation of mist/air cooling in a single slot jet impingement

TAN Xiao-ming, LI Ye-fang, ZHANG Jing-zhou

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Numerical simulation was carried out on the heat transfer characteristics in a mist/air impinging single slot jet. The effects of phase-changing heat transfer of the water droplets, the mist mass ratio in the air and the geometrical parameters of the slot jet were studied to reveal the enhancement of heat transfer. The simulated results show that adding liquid droplets in an air flow enhances the cooling effect drastically. 90% cooling enhancement at the stagnation point was achieved by injecting 5% of droplets with the heat flux of 8000 W/m^2 . When the mist/air mass ratio increases from 1% to 5%, the heat transfer enhancement of the stagnation region is 32%. Proper jet width and impinging height are important parameters for cooling effect. In this study, the best impinging cooling effect was achieved with the impinging height to jet width ratio of 4.55.

Key words: mist/air; impinging cooling; phase-change heat transfer; single slot; numerical simulation

作为提高局部传热系数最有效的方法之一, 单相喷射冲击冷却在电子芯片、涡轮叶片前缘、高效磨削弧区等得到了广泛的研究和应用。常规的空气喷流冷却已经取得了较多的研究成果^[1-4], 而对于夹带液滴的水雾/空气和水雾/蒸汽等含湿气流冲击冷却方面的研究却相对较少。早在 20 世纪

七八十年代, 液滴冲击冷却的研究已引起研究人员的关注, 并对单个液滴的冲击换热进行了很多分析^[5]。童齐宝, LI, WANG 和 Gaddis 等^[6-11]对单缝、单孔排和多孔排水雾/蒸汽冲击冷却分别进行了实验与计算模拟研究, 利用 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的细小水滴由蒸汽夹带喷射到高温目标表面进行换热,

收稿日期: 2011-12-27

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130114.1726.201301.129_018.html

基金项目: 国家自然科学基金(51076063)

作者简介: 谭晓茗(1976—), 女, 江苏邳州人, 副教授, 主要从事传热传质、主动流动控制研究。E-mail: txmyy@nuaa.edu.cn

发现当水雾在气流中的质量分数为 0.5%~5% 时,滞止点附近冷却效果将显著加强 50%~800%,且这种增强效果受壁面热流密度的大小影响较大.安庆龙等^[12]开发出一套低温气动喷雾射流冲击冷却系统,将其应用于钛合金的磨削加工中.姜澎等^[13]利用 ANSYS-CFX 软件对 WANG 等人^[14]实验研究的水雾/蒸汽相变冲击冷却系统进行了数值模拟,数值分析结果与实验数据比较接近,将水雾/蒸汽冲击冷却数值计算结果与蒸汽单相冲击冷却计算结果进行比较,发现水滴的汽化吸收的热量对于冷却作用的贡献比较大.

针对高效磨削加工中因不能有效控制磨削区温度而造成工件烧伤及加工质量不易保证的难题,本文提出采用饱和湿空气夹带液滴的含湿气

流单缝冲击的冷却方案.为了分析含湿气流的冷却效果,本文借助计算流体动力学(CFD)软件 Fluent 对单缝冲击的二维物理模型进行数值模拟,研究了含湿气流中液滴蒸发相变换热对冲击冷却效果的增强作用以及液滴载量比和气流冲击径高比等因素对冲击冷却效果的影响.

1 物理数学模型

1.1 几何模型

图1为含湿气流单缝冲击冷却的二维物理模型,冲击缝宽 b 为 5~17 mm、冲击高度 H 为 22~110 mm、通道长度 L 取 250 mm.以冲击缝中轴线为对称中心线,取 1/2 结构区域为计算域.

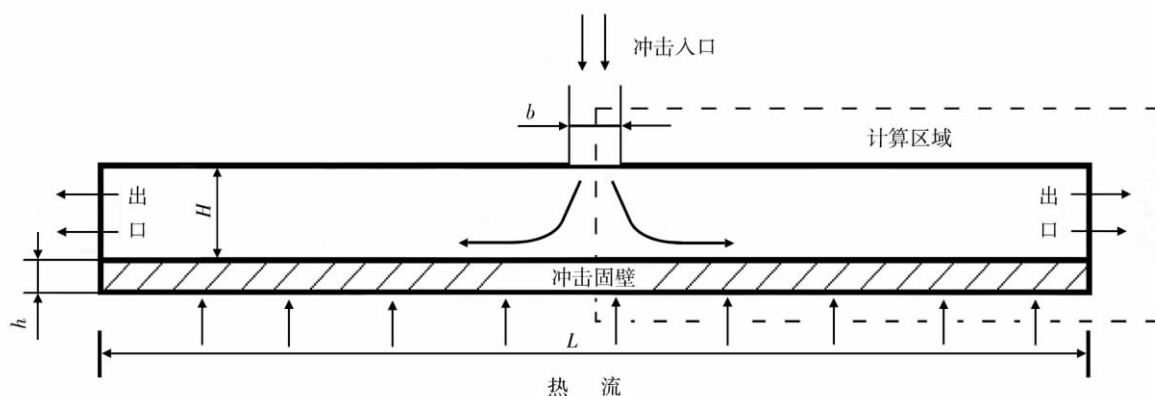


图1 计算区域示意图

Fig. 1 Schematic of the computational domain

1.2 多相流模型

混合模型是一种简化的多相流模型.考虑到在本文的研究工况下,分散相有着宽广的分布,完善的多相流模型并不切实可行.因此本文选用混合模型进行计算.

混合模型通过引入滑移速度的概念,允许各相以不同的速度运动,并形成强烈的耦合.其求解的是混合相的连续、动量和能量方程,第 k 相的 Volume Fraction 方程,并通过相对速度来描述离散项.

混合相的连续方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m) = \dot{m} \quad (1)$$

式中质量平均速度 $\bar{v}_m = (\sum_{k=1}^3 \varphi_k \rho_k \bar{v}_k) / \rho_m$, 这里 ρ_m 是混合密度, $\rho_m = \sum_{k=1}^3 \varphi_k \rho_k$; φ_k , ρ_k , $\bar{v}_k$ 分别是第 k 相体积分数、密度和平均速度($k=1,2,3$; 1 为干

空气相, 2 为液滴相, 3 为水蒸气相); $\dot{m}$ 描述了液滴相变过程中水从液相(2 相)传递到气相(3 相)的质量,具体公式为

当 $T_f > T_{sat}$ 时

$$m_{2,3} = 0.1 \times \varphi_2 \rho_2 \frac{T_f - T_{sat}}{T_{sat}} \quad (2)$$

式中 T_f 表示流体温度; T_{sat} 表示饱和温度; 0.1 为经验常数^[15].

混合相的动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m v_m) + \nabla \cdot (\rho_m v_m v_m) = \\ -\nabla p + \rho_m g + F + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla v_m + \nabla v_m^T)] + \\ \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^3 \varphi_k \rho_k v_{dr,k} v_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 ∇p , $\rho_m g$, F 分别为压差、重力和其他体积力, 本文引入重力作用对液滴运动的影响; μ_m 是混合黏度, $\mu_m = \sum_{k=1}^3 \varphi_k \mu_k$; $v_{dr,k}$ 是第 k 相的漂移速度,

$v_{dr,k} = v_k - v_m$, 这里 v_k 为第 k 相的速度, v_m 为混合速度.

混合相的能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^3 (\varphi_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^3 [\varphi_k \bar{v}_k (\rho_k E_k + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + q_s \quad (4)$$

式中 $E_k = h_k - p/\rho_k + v_k^2/2$, 这里 h_k 为第 k 相的比焓, p 为静压; 等式右边的第 1 项代表了由于传导造成的能量传递, k_{eff} 是有效导热系数; 第 2 项 q_s 描述了液滴相变过程中吸收或释放的热量, $q_s = -\dot{m} \times e_s$, 水的汽化潜热 $e_s = 2.2572 \times 10^6$ J/kg.

第 i 相 ($i=2,3$) 的体积分方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi_i \rho_i) + \nabla \cdot (\varphi_i \rho_i v_m) = -\nabla \cdot (\varphi_i \rho_i v_{dr,i}) \quad (5)$$

其中 $v_{dr,i}$ 为第 i 相漂移速度, $v_{dr,i} = v_{1,i} - \sum_{i=1}^3 \frac{\varphi_i \rho_i v_{1,i}}{\rho_m}$, 这里 $v_{1,i}$ 为相对速度或滑流速度. 混合模型假定多相流体在短空间尺度上构成局部的平衡, 因此, 其相对速度采用代数滑移公式, 其形式为

$$v_{1,i} = v_i - v_1 = \tau_{1,i} a$$

式中 $\tau_{1,i}$ 是液滴或气泡弛豫时间, 表达形式为

$$\tau_{1,i} = (\rho_m - \rho_i) d_p^2 / (18 \mu_1 f_{drag})$$

式中 f_{drag} 为曳力函数, 考虑到 Schiller-Naumann 函数普遍适用于一般气液多相流动的计算, 故选用该种曳力函数

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re & Re > 1000 \end{cases}$$

a 是液滴或气泡的加速度, 其具体形式为

$$a = g - (v_m \cdot \nabla) v_m - \partial v_m / \partial t$$

这里 g 为重力加速度; $v_{1,i}$ 为液相相对于第 i 相的速度.

由于本文仅进行稳态计算, 因而控制方程中与时间相关的项均为 0.

1.3 湍流模型

鉴于标准 $k-\epsilon$ 模型对于模拟旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离等有很好的表现, 本文经过综合比较几种湍流模型的计算结果并与文献[8]中实验描述结果进行对比后, 确定选用标准 $k-\epsilon$ 模型. 由于标准 $k-\epsilon$ 模型是高雷诺数湍流模型, 因此在近壁区采用增强壁面函数 (enhanced wall treatment) 进行修正.

1.4 物性参数

含湿气流 (混合流): 假设混合流为不可压缩理想气体, 混合流的导热系数和黏度采用理想气体混合定义进行计算, 比热容和热扩散率变化分别遵循混合定律和 Kinetic 定律.

空气 (连续相): 连续相气体为对应入口温度和压力条件下的饱和湿空气 (每千克干空气含水量 $d=20$ g), 假设其是由干空气和水蒸气 2 种组分组成, 采用组分输运方程进行描述. 其中, 干空气的各项物性定义为随温度变化的函数, 具体参照干空气热物理性质表; 水蒸气物性假设为常数.

液滴 (颗粒相): 假设液滴的密度和导热系数为常数, $\rho_p = 998.2$ kg/m³, $k_p = 0.6$ W/(m·K).

冲击固壁 (固体域): 材料采用 M50 钢.

2 计算方法

2.1 网格划分

针对图 1 所示的物理模型示意图, 计算域整体采用结构化网格. 为了保证网格的独立性, 以某模型为例 (冲击缝宽为 7.5 mm, 冲击高度为 22.5 mm), 对网格总数为 5000, 7000, 10000, 20000 以及第 1 层网格高度为 0.08, 0.10, 0.20 mm 的网格进行了计算比较, 最终确定采用冲击缝口尺寸因子为 0.25、 x 向尺寸因子为 0.8、 y 向尺寸因子为 0.6、第 1 层网格高度为 0.08 mm 的网格为计算网格, 如图 2 所示. 其他结构模型均参照此尺寸比例进行划分.

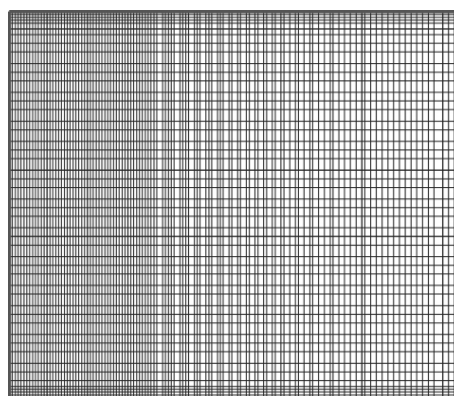


图 2 网格划分 (局部放大)

Fig. 2 Grids structure (partial enlargement)

2.2 边界条件与参数定义

连续相 (第 1, 3 相) 边界条件设置: 冲击入口为速度入口, $v_{in} = 9 \sim 14$ m/s, 入口温度 $T_{in} = 298.15$ K, 出口为压力出口; 冲击固壁上表面为耦

合壁面、下表面为恒热流壁面,其他壁面均设为绝热壁面;流体湍流强度为1%。

液滴相(第2相)边界条件设置:液滴入口温度、速度的设置与气流入口温度、速度一致;假设液滴直径分布均匀,单个液滴直径 d_p 均为 $10\mu\text{m}$;液滴相的入口体积分数按照湿空气与水的密度比和含湿气流中液滴质量分数的乘积计算获得;液滴相与水蒸气相之间的质量与能量交换通过编写用户自定义程序(UDF)以源项的形式引入计算,具体参照文中式(2)和式(4)。

本文主流冲击雷诺数的定义为

$$Re = v_{in} b / \nu \quad (6)$$

式中 ν 为空气的运动黏度。

液滴载量比的定义为

$$m_{mist} = \frac{g_{mist}}{G_{moist, air}} \times 100\% \quad (7)$$

其中 g_{mist} 为液滴相质量流量(kg/s); $G_{moist, air}$ 为含湿气流质量流量(kg/s)。

沿程表面传热系数

$$h_x = \frac{q_w}{T_{w, x} - T_{in}} \quad (8)$$

式中 $T_{w, x}$ 为当地壁面温度。

3 计算结果与分析

3.1 含湿气流的液滴夹带对冷却效果的影响

图3给出了 $H/b=3$ 时含湿气流冲击结构在入口雷诺数 $Re=12000$ 和液滴载量比为5%的条件下的流场图和液滴分布图。从图中可以看出,含湿气流冲击到靶面上在驻点区流动滞止,然后沿靶板表面向两侧流动,同时出现向上卷绕的涡流。液滴随着气流在驻点区滞止并逐渐累积,随后在靶面上随着气流扩散。部分液滴随着向上卷绕的气流的带动而远离壁面,这种上浮现象降低了液滴对滞止区域下游靶面的冷却增强效果。

图4给出了在入口雷诺数 $Re=12000$ 的条件下,含湿气流是否夹带液滴($m_{mist}=5\%$)对沿程表面传热系数和冲击壁面温度分布的影响。从图4可以看出,热流密度为 8000W/m^2 的条件下,冲击中心区域含湿气流的表面传热系数比纯饱和湿空气的表面传热系数增大了约90%。分析认为,这种增强效果应是液滴相变换热带走部分潜热、液滴引入使得冷却介质的比热容增加、液滴的动力特性对流场进行扰动等因素的综合影响结果。

图5给出了在冷却介质条件一定的情况下,冲击壁面热流密度对含湿气流相对纯饱和湿空气

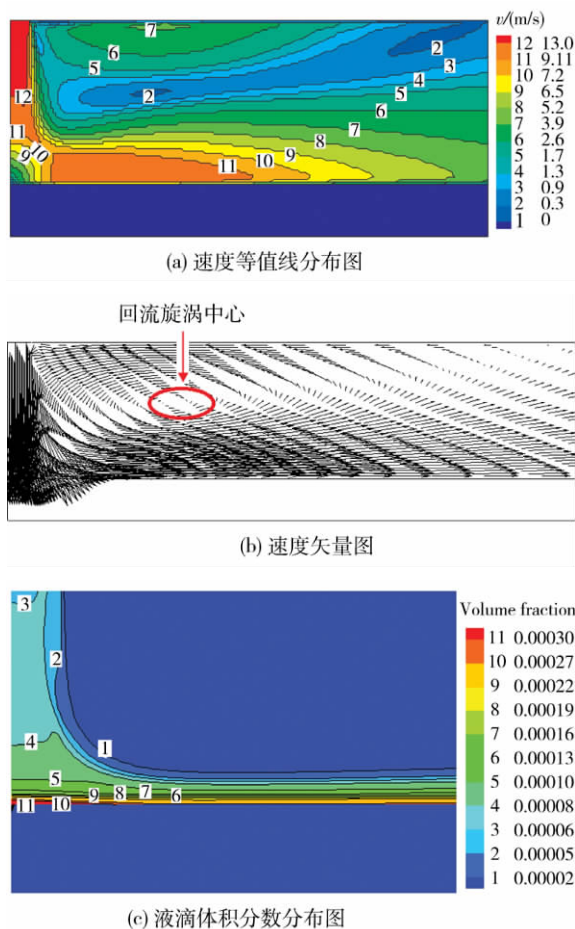


图3 流场图和液滴分布图

Fig. 3 Velocity and droplet volume fraction

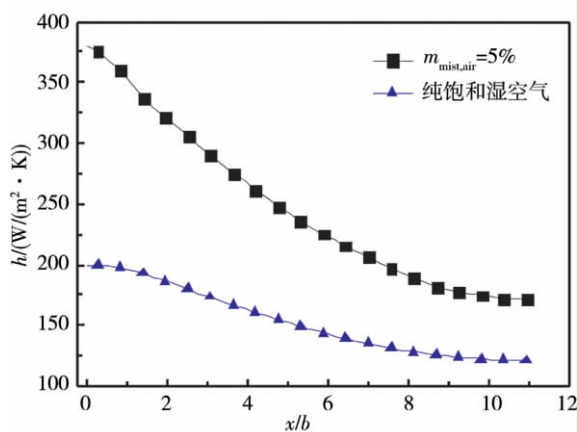


图4 液滴对冷却效果的影响

Fig. 4 Effects of droplet on cooling performance

的传热增强系数的影响。图中纵坐标表示传热增强系数 $\epsilon = h_{mist, air} / h_0$ ($h_{mist, air}$ 为含湿气流冲击冷却沿程表面传热系数, h_0 为纯饱和湿空气冲击冷却沿程表面传热系数)。

由图5可以看出,不管靶面热流密度大小,在冲击驻点区板面的温度最低,传热系数最大。随着

热流密度的增大,传热增强系数逐渐减小,而且当热流密度达到 $q_w = 16000 \text{ W/m}^2$ 时,这种增强效果已经非常微弱.这说明当靶面受热越来越严重的条件下,含湿气流的换热增强优势将逐渐减弱.

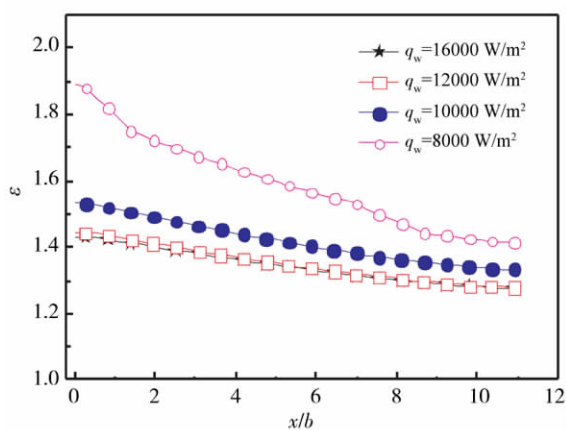


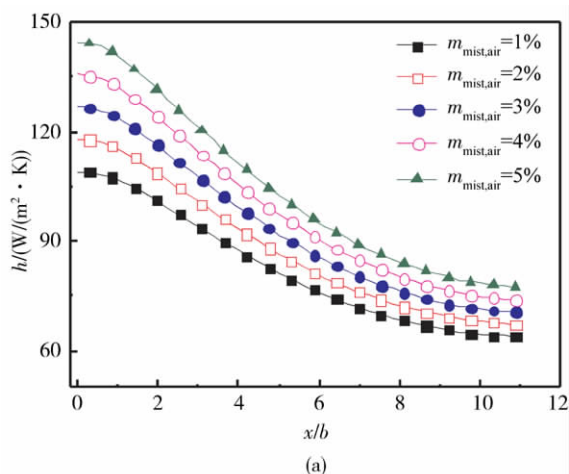
图 5 热流密度对含湿气流换热增强效果的影响

Fig. 5 Effects of heat flux on cooling enhancement of mist/air flow

3.2 含湿气流的液滴载量比对冷却效果的影响

图 6 给出了在壁面热流密度为 16000 W/m^2 、气流入口雷诺数 $Re = 12000$ 时,液滴载量比的变化对冲击壁面沿程表面传热系数和表面温度分布的影响.

从图 6(a)可以看出,冲击壁面沿程表面传热系数随着液滴载量比的增大而提高.在冲击中心区域,由于液滴相变换热的存在,表面传热系数受液滴载量比的影响较大,这一区域的换热效果较好;在下游区域,其带来的影响相对减小,但由于液滴载量大的气流中有部分残余液滴进入下游蒸发,使得换热增强效应仍得以发挥.对于冲击驻点,当液滴载量比从 1% 提高到 5%,驻点区局部传热系数提高了 32%.



(a)

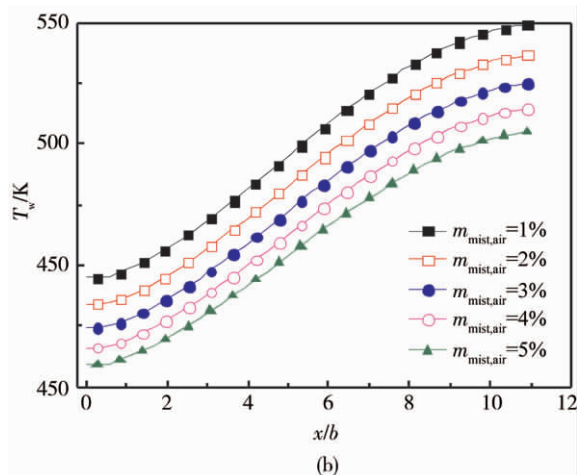


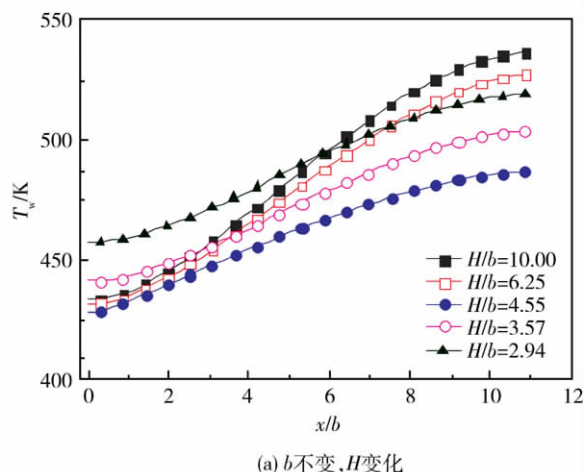
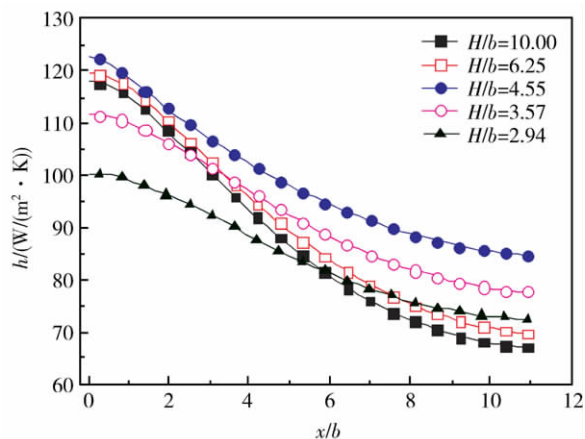
图 6 液滴载量比对冲击冷却效果的影响 ($H/b = 2.94$)

Fig. 6 Effects of mist/air mass ratio on cooling performance ($H/b = 2.94$)

若为防止磨削工件烧伤,以冲击表面温度下降到 150°C (423.15 K) 为需求,从冲击壁面沿程温度分布(图 6(b))可以看出,在本文讨论条件下,当液滴含量大于 6% 时,冲击中心区域将满足冷却要求.

3.3 冲击结构 (H/b) 对冷却效果的影响

图 7 给出了壁面热流密度为 16000 W/m^2 , 冲



(a) b 不变, H 变化

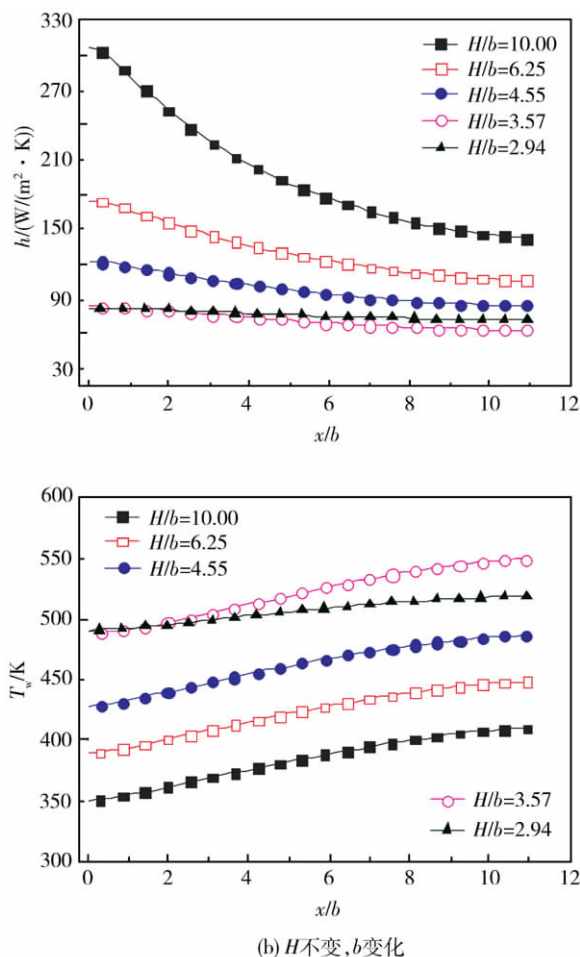


图7 冲击高度与缝宽的比值对冷却效果的影响

Fig. 7 Effects of (H/b) on cooling performance

击入口雷诺数 $Re = 12\,000$ 和液滴载量比 $m_{mist} = 2\%$ 时,冲击高度与冲击缝宽之比 (H/b) 变化对冲击壁面沿程表面传热系数和温度分布的影响。其中,图 7(a) 为冲击缝宽不变 ($b = 11\text{ mm}$)、冲击高度变化 ($H = 32 \sim 110\text{ mm}$) 的情况;图 7(b) 为冲击高度不变 ($H = 50\text{ mm}$)、冲击缝宽变化 ($b = 5 \sim 17\text{ mm}$) 的情况。

从图 7(a) 上图中可以看出,当冲击缝宽 b 不变时,壁面沿程表面传热系数随着 H/b 的增大呈先增大后减小的趋势,说明冲击高度并不是一味增大或降低才是有利于换热的,在本文条件下 H/b 为 4.55 时换热效果最佳;从图 7(b) 上图中可以看出,当冲击高度 H 不变时,壁面沿程表面传热系数随着 H/b 的增大而增大,且这种增强效果逐渐显著。这种现象主要是由于(如图 8 所示):在入口质量流量一定的条件下,减小冲击缝宽,意味着含湿气流流速增大而增强了对流换热;同时液滴流速增加,不仅加强了对主流的扰动,同时在一定的弛豫时间范围内其作用的区域增大。

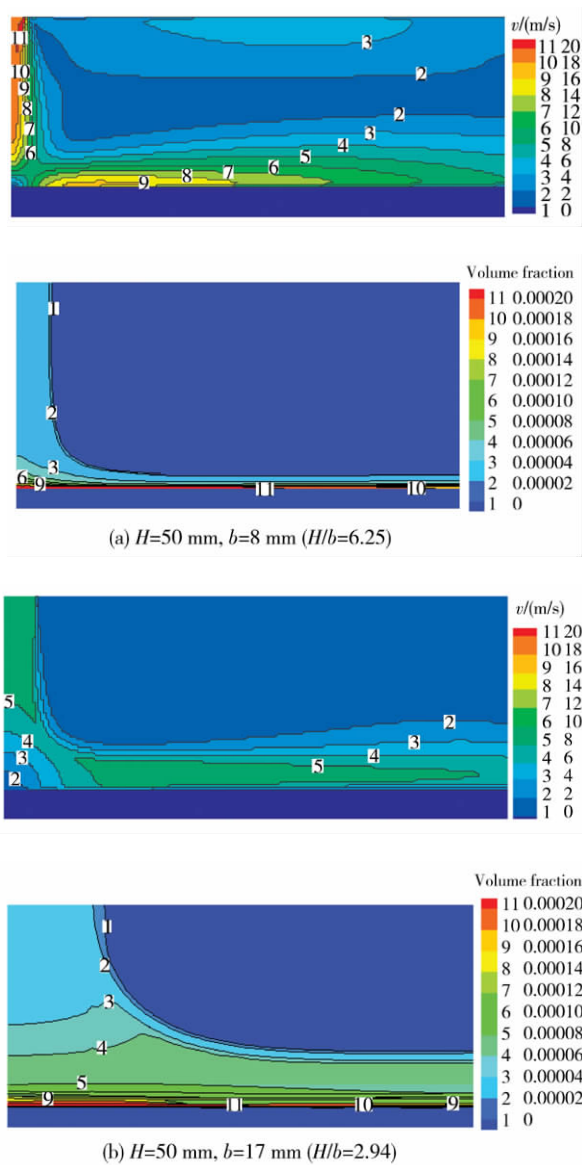


图8 冲击高度与缝宽的比值对流场和液滴分布的影响

Fig. 8 Effects of (H/b) on velocity and droplet volume fraction

在本文讨论条件下,当入口质量流量一定时,选择合适的冲击高度并适当减小冲击缝宽有利于改善目标表面的冷却效果。

4 结 论

本文比较研究了含湿气流中液滴蒸发相变换热对冲击冷却效果的增强作用以及液滴载量比和气流冲击径高比等因素对冲击冷却效果的影响,取得了以下结论:

1) 夹带液滴的含湿气流能有效增强气流冲击冷却效果,但随着冲击壁面热流密度的增加,这种增强效果将逐渐减小。

2) 冲击壁面沿程表面传热系数随着液滴载量比的增大而提高,从冲击中心区域往下游区域其带来的影响逐渐减小;对于冲击驻点,当液滴载量比从1%提高到5%,驻点区局部换热系数提高了32%。

3) 含湿气流入口气体质量流量一定的条件下,当冲击缝宽 b 不变时,冲击壁面沿程表面传热系数随着 H/b 的增大呈先增大后减小的趋势;当冲击高度 H 不变时,冲击壁面沿程表面传热系数随着 H/b 的增大而增大,且这种增强效果逐渐显著。在本文条件下 H/b 为4.55时换热效果较好。

参考文献:

- [1] 张靖周,李永康,谭晓茗,等.阵列射流冲击冷却局部对流换热特性的数值计算与实验研究[J].航空学报,2004,25(4):339-342.
ZHANG Jingzhou, LI Yongkang, TAN Xiaoming, et al. Numerical computation and experimental investigation on local convective heat transfer characteristics for jet array impingement[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(4): 339-342. (in Chinese)
- [2] 谭蕾,张靖周,谭晓茗.非均匀横流作用下冲击射流冷却的数值研究[J].航空动力学报,2006,21(3):528-532.
TAN Lei, ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming. Numerical investigation of jet impingement cooling with non-uniform crossflow[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3): 528-532. (in Chinese)
- [3] 徐国强,谢毅,丁水汀,等.“冲击-气膜”复合式结构冷却效果数值研究[J].热科学与技术,2009,8(1):1-7.
XU Guoqiang, XIE Yi, DING Shuiting, et al. Numerical simulation on cooling effectiveness of combined impingement and film cooling[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2009, 8(1): 1-7. (in Chinese)
- [4] 宋双文,杨卫华,胡好生,等.冲击+逆向对流+气膜冷却传热特性的研究[J].航空动力学报,2007,22(9):1417-1422.
SONG Shuangwen, YAN Weihua, HU Haosheng, et al. Experimental study of the heat transfer characteristic of combined cooling of impingement + reversed convection + film[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(9): 1417-1422. (in Chinese)
- [5] 施明恒,白天池.冲击液滴的泡状沸腾换热[J].工程热物理学报,1989,10(2):193-195.
SHI Mingheng, BI Tianchi. Boiling heat transfer of jet droplets[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1989, 10(2): 193-195. (in Chinese)
- [6] 童齐宝,王锁芳.叶片内部蒸汽冷却的数值模拟[J].航空动力学报,2008,23(8):1364-1369.
DONG Qibao, WANG Suofang. Numerical simulation of a steam-cooled vane[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(8): 1364-1369. (in Chinese)
- [7] LI X, Gaddis J L, WANG T. Mist/steam heat transfer in confined slot jet impingement[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(1): 161-167.
- [8] LI X, Gaddis J L, WANG T. Mist/steam cooling by a row of impinging jets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(12): 2279-2290.
- [9] LI X, Gaddis J L, WANG T. Modeling of heat transfer in a mist/steam imping jet[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 123: 1086-1092.
- [10] WANG T, Gaddis J L, LI X. Mist/steam heat transfer of multiple row of impinging jets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(25/26): 5179-5191.
- [11] WANG T, LI X. Simulation of mist film cooling at gas turbine operating conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(21/22): 5305-5317.
- [12] 安庆龙,傅玉灿,徐九华,等.低温气动喷雾射流冲击冷却技术在钛合金磨削中的应用[J].中国机械工程,2006,17(11):1117-1120.
AN Qinglong, FU Yucan, XU Jiuhua, et al. Application of cryogenic pneumatic mist jet impinging in grinding of Ti-6Al-4V[J]. Journal of Chinese Mechanical Engineering, 2006, 17(11): 1117-1120. (in Chinese)
- [13] 姜澎,黄洪雁,冯国泰,等.水雾/蒸汽相变冲击冷却的数值模拟[J].哈尔滨工程大学学报,2009,30(10):1098-1102.
JIANG Peng, HUANG Hongyan, FENG Guotai, et al. Numerically simulating mist/steam impingement cooling with phase change[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(10): 1098-1102. (in Chinese)
- [14] WANG T, Dhanasekaran T S. Calibration of a computational model to predict mist/steam impinging jets cooling with an application to gas turbine blades[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 132(12): 122401. 1-122401. 11.
- [15] Flunet Inc. FLUENT user's guide[M]. Lebanon, NH: Flunet Inc., 2004.